

RESISTÊNCIA AOS CLORETOS E AOS SULFATOS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E DIFERENTES POZOLANAS

Paulina Faria Rodrigues

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, mpr@fct.unl.pt

RESUMO

Apresentam-se os resultados de ensaios de resistência aos cloretos e aos sulfatos de argamassas de cal aérea e diferentes pozolanas (com traços volumétricos 1:0,5:3, 1:1:4 e 1:1,5:5 de cal aérea:componente pozolânico:areia de rio). Correlacionam-se esses resultados com as características obtidas em termos de porosidade, resistências mecânicas e desenvolvimento de compostos hidráulicos, particularmente no que respeita às argamassas com traço intermédio em componente pozolânico, cujas características mostraram ser adequadas para aplicação em rebocos de edifícios históricos.

1. Introdução

Do ponto de vista dos requisitos a cumprir pelas argamassas a aplicar em rebocos de edifícios históricos considera-se estas devem garantir a protecção dos substratos e que, sem que esta premissa seja posta em causa, deverão dentro do possível assegurar ao máximo a sua durabilidade. Para que estes requisitos sejam cumpridos, as argamassas devem apresentar determinadas características que têm de ser compatibilizadas entre si. Questões relativas a baixa absorção capilar de água, eficiente evaporação de vapor de água, resistências mecânicas compatíveis com o substrato (mais baixas e apresentando maior deformabilidade), estabilidade dimensional, aderência ao suporte e baixa libertação de sais solúveis são fundamentais para a garantia da protecção das alvenarias e devem ser tomadas como preponderantes em edifícios históricos. No entanto, aspectos relativos à resistência aos sais solúveis e à acção do gelo e de um modo geral relacionados com a integridade da argamassa em si (tais como o ganho de presa num curto período de tempo ou a resistência a acções de choques) são fundamentais para garantir a sua durabilidade. Para que as argamassas não ponham em causa a protecção dos suportes sobre os quais venham a ser aplicadas, as suas características de durabilidade não podem contrariar a necessidade genérica de compatibilização com esse mesmo suporte [1]. Torna-se assim fundamental que, ao nível das argamassas a preparar *in loco*, a resistência aos sais solúveis seja obtida não tanto com recurso a características ao nível de resistências mecânicas mas da existência de uma microestrutura interna adequada.

Com vista a um melhor conhecimento da utilização de argamassas de cal aérea na conservação de edifícios históricos, desenvolveu-se um programa experimental no qual se avaliaram os efeitos da introdução de componentes pozolânicos nessas argamassas, tendo em vista a optimização das suas características e desempenho geral [2].

No estudo em questão utilizaram-se e caracterizaram-se diferentes componentes pozolânicos. Para comparação com uma argamassa de cal aérea como único ligante prepararam-se três composições com cada um dos componentes pozolânicos, mantendo a proporção em volume de uma parte de ligante (cal aérea hidratada e componente pozolânico) e duas partes da mesma areia de rio (traços volumétricos 1:0,5:3, 1:1:4, 1:1,5:5). Todas as argamassas foram realizadas com consistências por espalhamento semelhantes e os respectivos provetes foram sujeitos a cura durante dois meses em

ambiente seco ou em ambiente saturado. Prepararam-se vários provetes com cada tipo de argamassa/condição de cura.

Através de diversos ensaios determinaram-se as características obtidas com os diferentes componentes utilizados nas argamassas, suas proporções e condições de cura. As características em análise neste estudo mais abrangente foram a retenção de água, o módulo de elasticidade dinâmico, as resistências à tracção por flexão e à compressão, a profundidade de carbonatação, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta, a condutividade para avaliar o teor em sais solúveis, a concentração em ião cálcio, as análises térmicas e por microscopia electrónica de varrimento (SEM), a retracção linear, a permeabilidade ao vapor de água, a aderência, a absorção de água por capilaridade, a resistência aos cloretos e aos sulfatos. Atribui-se uma grande relevância a estes últimos ensaios uma vez que a resistência aos sais é fundamental no que respeita à durabilidade de argamassas de edifícios históricos.

Neste artigo apresentam-se apenas os resultados obtidos nos ensaios de resistência aos cloretos e aos sulfatos de argamassas de cal aérea e distintos componentes pozolânicos realizadas com as diferentes composições e sujeitas às duas condições de cura distintas, a fim de ser possível comparar do ponto de vista da resistência a estes sais não só a influência do tipo de componente pozolânico utilizado mas também da sua proporção na mistura volumétrica com o ligante e ainda com a cura.

Nos estudos mais amplos desenvolvidos e referidos anteriormente [2] verificou-se que de entre os três traços em análise, de um modo geral e tendo em conta a apreciação das características obtidas do ponto de vista da aplicação das argamassas em rebocos de edifícios históricos, sobressairam como mais eficientes as argamassas com traço intermédio em componente pozolânico. Daí terem-se analisado e correlacionado os resultados de resistência aos sais obtidos, com as resistências mecânicas (flexão e compressão) e a porosidade aberta das argamassas ao traço intermédio e, para algumas dessas argamassas, a microestrutura observada, pela análise térmica e por SEM em termos do desenvolvimento dos cristais de silicatos de cálcio hidratados (CSH) e da pozolanicidade dos componentes pozolânicos utilizados.

2. Desenvolvimento experimental

2.1 Preparação do material

Utilizou-se sempre areia de rio proveniente do mesmo lote (de modo a excluir a variabilidade deste material). A cal utilizada foi cal aérea hidratada comercializada em pó – **lime**. Utilizou-se uma pozolana natural em pó – **poz** – proveniente da ilha de Stº. Antão (República de Cabo Verde). As cinzas volantes utilizadas – **fly** – são um subproduto industrial em pó recolhido de centrais termoeléctricas que operam com carvão mineral como combustível. O material cerâmico utilizado foi obtido por recolha pelos despoeiradores de uma fábrica de telhas de barro vermelho, durante o processamento da matéria-prima crua. Este material foi então sujeito a tratamento térmico em laboratório durante 3,5 horas a 600°C (**cer600**) e a 800°C (**cer800**) e durante 30 minutos a 700°C (**cer700**). O caulino utilizado foi procedente de Alvarães (região de Viana do Castelo), tendo sido posteriormente esmagado e peneirado. Utilizou-se o material que passou pelo peneiro ASTM nº30, que foi então sujeito a tratamento térmico durante 3,5 horas a 600°C (**kao600**) e a 800°C (**kao800**) e durante 30 minutos às mesmas temperaturas (respectivamente **kao600** e **kao800**).

2.2 Preparação dos provetes

Para a realização das amassaduras, a mistura dos componentes das argamassas foi mecânica e sempre idêntica. A quantidade de água introduzida nas argamassas foi a que produziu nelas uma consistência por espalhamento comparável e considerada apropriada para a aplicação dessas mesmas argamassas sobre um suporte [3]. Os provetes prismáticos foram compactados em duas camadas e sujeitos a dois tipos de curas até atingirem a idade em que eram ensaiados (60 dias): $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de humidade relativa (HR) – cura seca **D**; num saco plástico fechado até à data de desmoldagem e desde então e até à idade de ensaio num compartimento com ambiente saturado – cura húmida **H**.

2.3 Ensaio e resultados

No que respeita à caracterização das argamassas e a fim de serem adoptados procedimentos idênticos ao longo do programa de ensaios, todos os provetes (provenientes de curas secas ou húmidas) foram colocados numa estufa a 60°C uma semana antes de atingirem a idade de ensaio (60 dias), de modo a atingirem massa constante. As resistências à tracção por flexão e à compressão, assim como a porosidade aberta foram avaliadas a partir de três provetes prismáticos de cada argamassa/condição de cura. Outros três provetes prismáticos foram partidos em metades (por ensaio de flexão realizado previamente) e primeiro utilizados para a determinação da absorção de água por capilaridade, até determinação do correspondente valor assintótico (quantidade total de água absorvida, obtida ao fim de alguns dias) [3]. Após secagem subsequente até atingirem novamente massa constante, três meios provetes foram sujeitos a ensaio de resistência aos cloretos, enquanto os restantes três meios provetes foram submetidos ao ensaio de resistência aos sulfatos. Nos casos em que foi possível proceder a análises térmicas e a examinação por SEM de algumas das argamassas/condições de cura, esses provetes tinham entre um e dois anos de idade.

Apresentam-se na tabela 1 as formulações das argamassas e a respectiva consistência por espalhamento obtida. Cada argamassa é identificada pela designação do componente pozolânico utilizado, pelo traço utilizado na formulação (**1** – 1:0,5:3; **2** – 1:1:4; **3** – 1:1,5:5) e pelo tipo de cura a que foi sujeita (**D** – seca ou **H** – húmida). A argamassa designada por **lime0** (constituída por uma parte de cal aérea e duas partes de areia de rio) é considerada como de referência.

2.3.1 Pozolanidade dos componentes

A pozolanidade dos componentes foi avaliada por aplicação do procedimento descrito na NP EN 196-5 [4], sobre amostras de material obtidas de acordo com a NP 4220 [5], constituídas por 75% de cimento Portland tipo I 42,5 R e 25% de componente pozolânico.

Na fig. 1 apresenta-se a relação entre as concentrações em óxido de cálcio e em iões hidróxilos detectadas na preparação realizada a 40°C de temperatura para cada componente pozolânico. Comparativamente à curva que corresponde ao limite de saturação em óxido de cálcio, constata-se que as pozolanas artificiais sujeitas a tratamento térmico durante um período longo (3,5 horas) e/ou a alta temperatura geralmente apresentam alta pozolanidade (casos dos componentes pozolânicos designados por **cer800**, **kao600**, **kao800** e **kao800''**). Os componentes identificados por **kao600''** e **cer700''** e por **cer600** e **fly** registam valores de pozolanidade semelhantes entre si, não tão elevados como os anteriores. A pozolana natural analisada (**poz**) apresenta a mais baixa pozolanidade. Os resultados obtidos com esta análise sobre alguns dos componentes pozolânicos são qualitativamente apresentados na tabela 3.

Tabela 1 – Designação das argamassas (componente pozolânico e tipo de cura), formulações (em volume) e espalhamento obtido

Argamassa	lime	poz	fly	cer600	cer800	cer700"	kao600	kao800	kao600"	kao800"	areia	espalh
lime0	1										2	67
poz 1D	1	0.5									3	70
poz 1H	1	0.5									3	70
poz 2D	1	1									4	67
poz 2H	1	1									4	69
poz 3D	1	1.5									5	71
poz 3H	1	1.5									5	75
fly 1D	1		0.5								3	73
fly 1H	1		0.5								3	69
fly 2D	1		1								4	70
fly 2H	1		1								4	70
fly 3D	1		1.5								5	75
fly 3H	1		1.5								5	71
cer600 1D	1			0.5							3	72
cer600 1H	1			0.5							3	71
cer600 2D	1			1							4	70
cer600 2H	1			1							4	74
cer600 3D	1			1.5							5	70
cer6003H	1			1.5							5	70
cer800 1D	1				0.5						3	72
cer800 1H	1				0.5						3	74
cer800 2D	1				1						4	77
cer800 2H	1				1						4	70
cer800 3D	1				1.5						5	70
cer800 3H	1				1.5						5	71
cer700"1D	1					0.5					3	67
cer700"1H	1					0.5					3	72
cer700"2D	1					1					4	69
cer700"2H	1					1					4	70
cer700"3D	1					1.5					5	68
cer700"3H	1					1.5					5	68
kao600 1D	1						0.5				3	71
kao600 1H	1						0.5				3	71
kao600 2D	1						1				4	72
kao600 2H	1						1				4	72
kao600 3D	1						1.5				5	69
kao600 3H	1						1.5				5	73
kao800 1D	1							0.5			3	69
kao800 1H	1							0.5			3	71
kao800 2D	1							1			4	74
kao800 2H	1							1			4	71
kao800 3D	1							1.5			5	72
kao800 3H	1							1.5			5	73
kao600"1D	1								0.5		3	70
kao600"1H	1								0.5		3	69
kao600"2D	1								1		4	68
kao600"2H	1								1		4	68
kao600"3D	1								1.5		5	68
kao600"3H	1								1.5		5	68
kao800"1D	1									0.5	3	69
kao800"1H	1									0.5	3	69
kao800"2D	1									1	4	67
kao800"2H	1									1	4	67
kao800"3D	1									1.5	5	73
kao800"3H	1									1.5	5	72

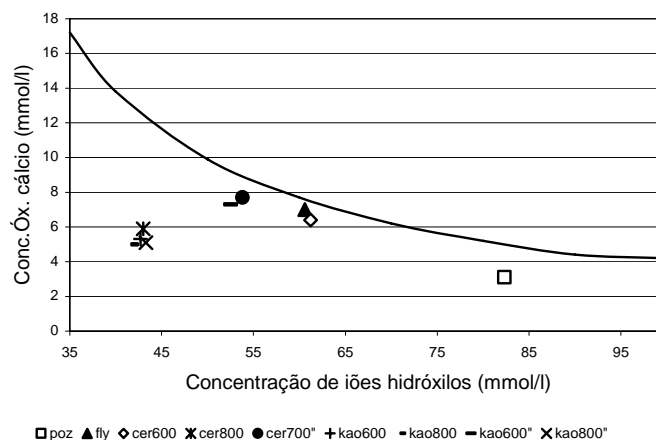


Fig. 1 – Pozolanicidade dos componentes

2.3.2 Resistências mecânicas à flexão e à compressão e porosidade aberta

A resistência à tracção por flexão foi determinada a partir do resultado do ensaio de flexão com três pontos efectuado sobre três provetes de cada argamassa e a resistência à compressão resultou do ensaio de compressão realizado sobre os seis meios provetes resultantes, de acordo com a ficha de ensaio Fe 27 UNL/FCT [3]. O ensaio para determinação da porosidade aberta realizou-se de acordo com procedimentos generalizados na comunidade científica internacional através de saturação total em água sob vácuo e pesagem hidrostática, de acordo com a ficha de ensaio Fe 02 UNL/FCT [3]. A tabela 2 apresenta os resultados das resistências à flexão e à compressão e a porosidade aberta obtidos com as argamassas analisadas.

2.3.3 Resistência aos cloretos

Para realização do ensaio de resistência aos cloretos imergiram-se três meios provetes de cada argamassa (seca a 105°C até atingir massa constante após ter sido utilizada no ensaio de capilaridade) numa solução saturada de cloreto de sódio durante 24 horas, após as quais os provetes foram de novo secos até atingirem massa constante. Pela diferença entre as massas secas de cada provete antes e após imersão foi possível determinar a quantidade de cloretos retidos, em termos da percentagem da massa seca inicial. Os provetes foram então condicionados numa câmara climática onde, à temperatura constante de 20°C, foram expostos a ciclos sucessivos de 12 horas a 90% de HR e 12 horas a 40% de HR. Todas as semanas e até se atingirem 50 ciclos, a massa dos provetes foi aferida para se determinar a variação de massa entretanto ocorrida e o seu estado de integridade foi avaliado, de acordo com a ficha de ensaio Fe 12 UNL/FCT [3]. A deterioração dos provetes geralmente ocorreu pelo desenvolvimento de desagregação superficial das argamassas, como se pode observar na fig. 2. Na tabela 2 apresentam-se os resultados do ensaio de resistência aos cloretos em termos de percentagem de cloretos retidos e da variação de massa após decorridos 30 e 50 ciclos e na fig. 3 regista-se o desenvolvimento da percentagem de variação de massa em função do número de ciclos decorridos.



Fig. 2 – Ensaio de resistência aos cloretos: provetes na câmara e tipo de degradação ocorrida

2.3.4 Resistência aos sulfatos

Para permitir a avaliação da resistência aos sulfatos três meios provetes de cada argamassa sobre os quais se tinha previamente procedido à realização do ensaio de absorção capilar foram secos - até atingirem massa constante. Os provetes foram imersos numa solução a 6% de sulfato de sódio anidro durante 2 horas e de novo secos durante 21 horas em estufa a 105°C. Após este período a massa foi de novo registada e visualizada a sua integridade. Estes ciclos de imersão, secagem e determinação da massa foram sucessivamente repetidos até à destruição dos provetes ou se completarem 25 ciclos, de acordo com a ficha de ensaio Fe 11 UNL/FCT [3]. A destruição de alguns provetes ocorreu por rotura interna da argamassa, como se pode observar na fig. 4. Os resultados em termos de percentagem da variação de massa após decorridos 5, 15 e 25 ciclos são apresentados na tabela 2, enquanto a fig. 5 regista a variação de massa em função do número de ciclos decorridos.

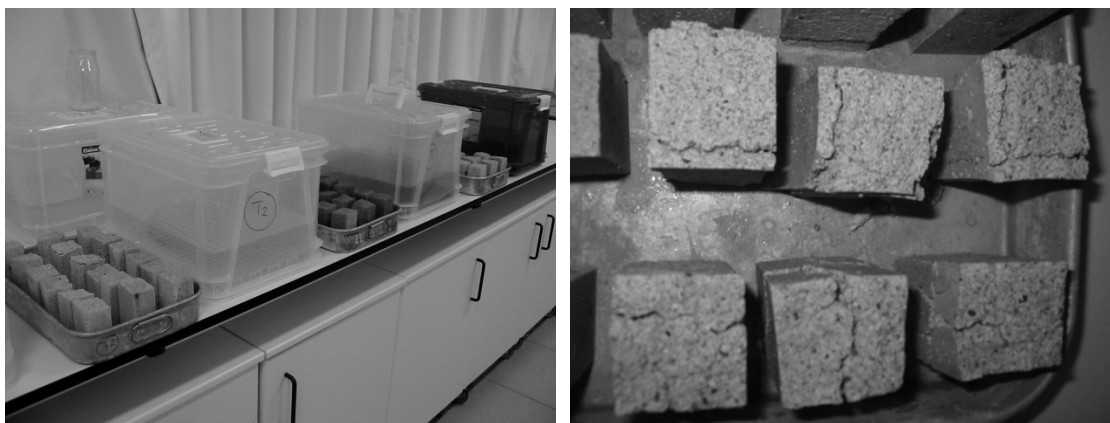


Fig. 4 – Ensaio de resistência aos sulfatos: provetes para imersão após secagem e tipo de degradação ocorrida

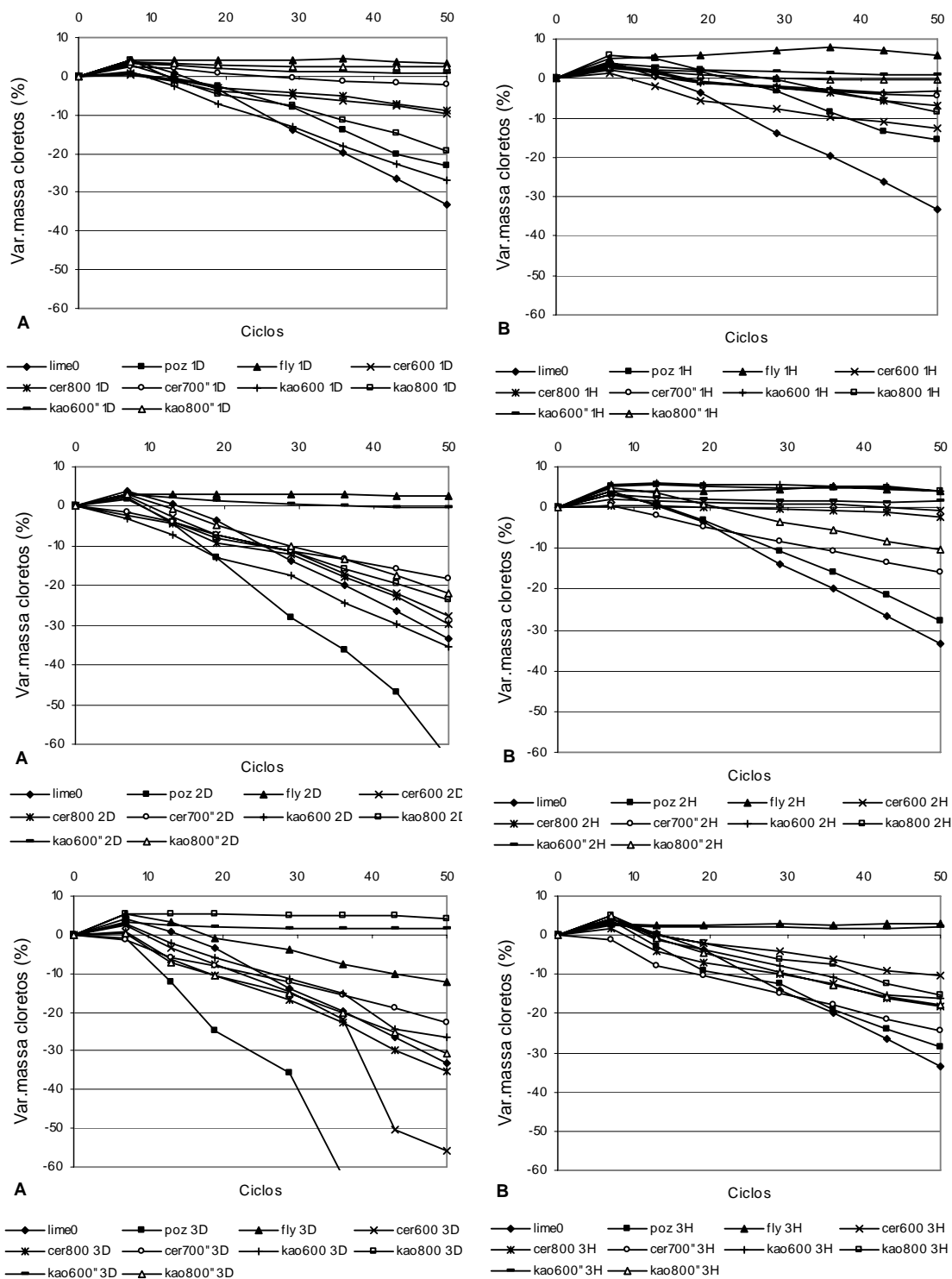


Fig. 3 – Variação de massa em função do número de ciclos humedecimento/secagem decorridos após ataque por cloretos (A – provetes de cura seca; B – provetes de cura húmida)

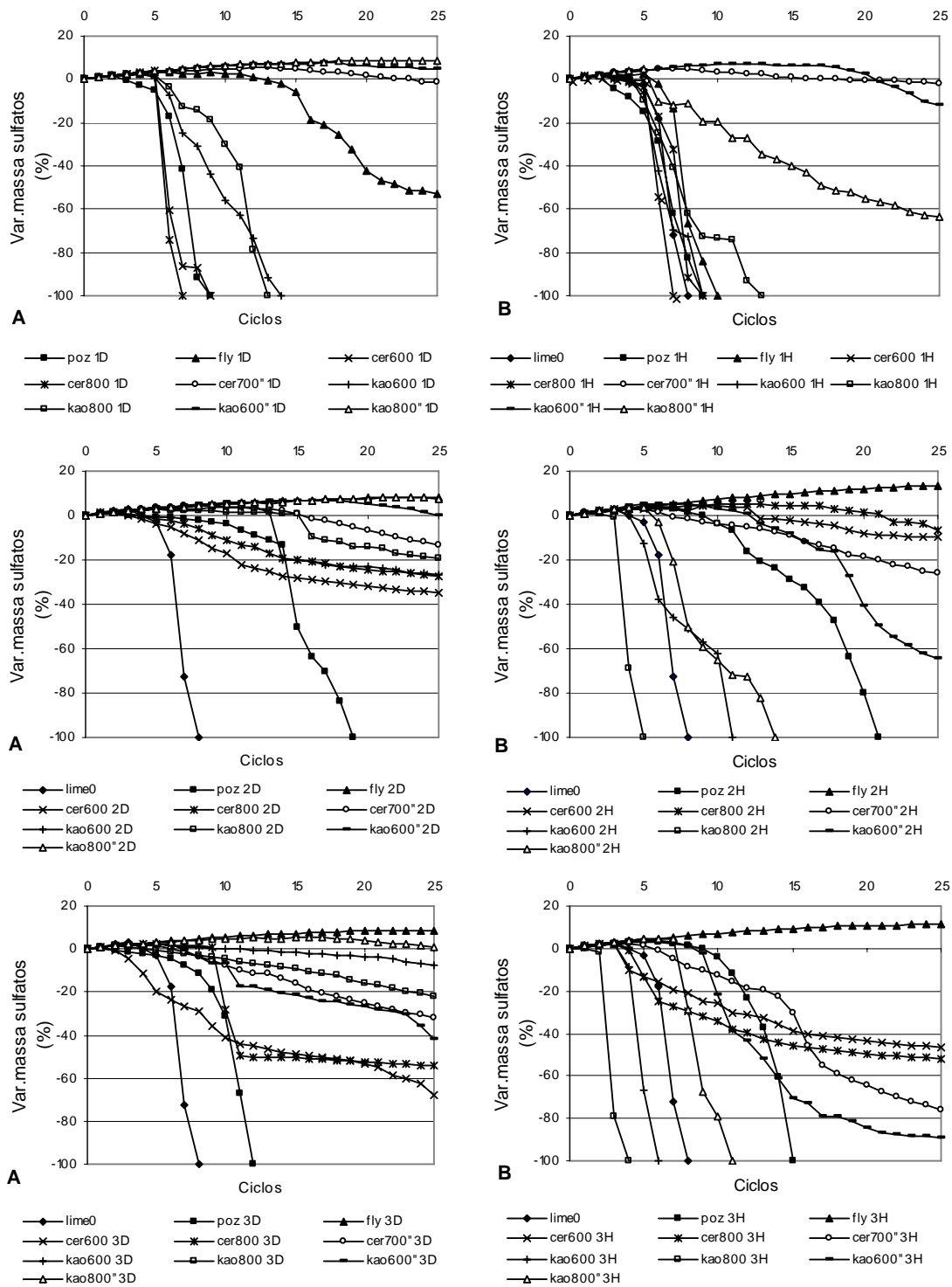


Fig. 5 – Variação de massa em função do número de ciclos secagem/imersão em sulfatos decorridos (A – provetes de cura seca; B – provetes de cura húmida)

Tabela 2 – Porosidade aberta e resistências mecânicas e aos sais das argamassas

Argamassa	Pab (%)	Rt (MPa)	Rc (MPa)	Cloret. Ret. (%)	R cloret (% var.massa)		R sulf (% var.massa)		
					30 c.	50 c.	c.5	c.15	c.25
lime0	34	0,33	0,7	4,4	-13,9	-33,4	-3,0	-100(8°)	
poz 1D	35	0,24	1,00	-	-7,9	-23,0	-5,2	-100(9°)	
poz 1H	37	0,13	1,46	-	-3,1	-15,7	-14,9	-100(9°)	
poz 2D	32	0,14	1,01	-	-29,7	-63,7	-0,4	-50,4	-100(19°)
poz 2H	36	0,17	1,27	5,6	-11,7	-27,7	3,1	-28,8	-100(21°)
poz 3D	34	0,16	0,89	3,1	-42,4	-79,7	-2,9	-100(12°)	
poz 3H	35	0,13	1,64	5,3	-14,1	-28,7	2,8	-100	
fly 1D	30	0,26	0,52	3,5	4,3	3,2	3,6	-6,0	-53,1
fly 1H	32	0,32	1,35	4,6	7,1	6,0	2,6	-100(10°)	
fly 2D	29	0,27	0,67	3,3	2,9	2,5	2,9	6,6	8,4
fly 2H	31	0,52	2,44	4,1	4,5	4,2	4,1	10,0	13,5
fly 3D	29	0,28	0,65	3,5	-4,8	-12,0	3,3	7,3	8,7
fly 3H	29	0,74	3,00	4,2	2,9	3,0	4,2	9,4	11,5
cer600 1D	34	0,25	0,54	3,0	-5,5	-9,6	3,7	-100(9°)	
cer600 1H	35	0,16	0,77	8,1	-8,3	-12,5	-0,5	-100(7°)	
cer600 2D	34	0,24	1,10	4,5	-11,1	-27,6	-3,6	-28,0	-34,8
cer600 2H	36	0,20	2,04	4,9	1,0	-0,6	3,2	-1,9	-9,5
cer600 3D	34	0,22	0,67	4,9	-14,8	-55,6	-19,7	-48,6	-67,5
cer6003H	35	0,09	0,78	5,7	-4,1	-10,4	-13,6	-38,7	-46,4
cer800 1D	33	0,29	0,67	3,2	-4,5	-8,7	1,8	-100(7°)	
cer800 1H	35	0,20	1,06	7,8	-2,8	-6,9	-3,6	-100(9°)	
cer800 2D	33	0,36	1,39	4,1	-12,0	-29,8	-1,1	-20,0	-27,0
cer800 2H	35	0,22	2,20	4,7	-0,4	-2,4	3,4	4,7	-6,7
cer800 3D	33	0,26	0,91	4,6	-16,7	-35,4	2,1	-50,6	-54,3
cer800 3H	32	0,08	0,75	5,4	-10,0	-18,0	-13,0	-45,6	-52,0
cer700"1D	34	0,20	0,39	3,5	-0,6	-2,2	3,2	5,0	-1,5
cer700"1H	34	0,09	0,29	4,5	-2,5	-4,3	4,1	,0	-1,7
cer700"2D	33	0,20	0,36	3,5	-11,3	-18,1	3,4	0,8	-13,1
cer700"2H	35	0,08	0,53	4,6	-8,3	-15,8	2,6	-9,1	-26,0
cer700"3D	32	0,14	0,30	3,4	-12,0	-22,7	1,5	-16,2	-31,6
cer700"3H	34	0,07	0,57	4,5	-14,8	-24,3	1,2	-30,0	-75,7
kao600 1D	35	0,38	1,18	4,8	-14,6	-26,7	0,9	-100(14°)	
kao600 1H	36	0,30	1,38	6,5	-2,1	-3,4	-6,5	-100(9°)	
kao600 2D	33	0,68	3,82	4,3	-17,3	-35,6	3,2	-19,8	-26,6
kao600 2H	34	0,80	6,98	5,1	5,6	4,2	-12,7	-100(11°)	
kao600 3D	33	0,37	1,03	4,5	-11,5	-26,3	2,6	-1,5	-7,5
kao600 3H	34	0,74	4,93	6,8	-8,0	-16,2	-66,6	-100(6°)	
kao800 1D	34	0,57	1,96	4,6	-7,7	-19,2	1,9	-100(13°)	
kao800 1H	35	0,52	3,01	5,2	-0,4	-8,4	-9,8	-100(13°)	
kao800 2D	34	0,48	2,88	4,6	-11,2	-23,4	2,7	0,5	-19,2
kao800 2H	33	1,07	8,00	4,9	5,0	4,1	-100		
kao800 3D	35	0,41	1,40	5,0	-6,0	-17,0	-0,8	-9,4	-22,2
kao800 3H	35	1,18	7,34	7,5	-6,4	-15,2	-100(4°)		
kao600"1D	34	0,20	0,46	3,8	1,3	0,8	3,6	7,3	5,0
kao600"1H	34	0,11	0,43	4,8	1,6	0,8	4,4	6,4	-12,1
kao600"2D	33	0,22	0,52	3,8	0,6	-0,1	3,5	6,9	0,1
kao600"2H	35	0,09	0,58	4,8	1,8	1,7	4,9	-8,1	-64,5
kao600"3D	34	0,28	0,70	3,5	-26,8	-46,9	2,2	-21,6	-42,1
kao600"3H	35	0,08	0,66	4,9	1,9	2,0	4,0	-70,5	-89,0
kao800"1D	34	0,38	0,97	4,0	2,6	2,6	3,7	7,6	8,8
kao800"1H	36	0,21	1,65	5,0	0,1	-0,2	5,0	-40,3	-63,7
kao800"2D	35	0,40	1,23	3,9	-10,2	-22,0	3,2	6,4	7,8
kao800"2H	35	0,49	4,20	5,9	-3,5	-10,2	3,6	-100(14°)	
kao800"3D	34	0,43	1,33	4,0	-15,2	-30,7	3,0	5,1	0,6
kao800"3H	36	0,92	6,68	6,5	-9,3	-17,9	4,2	-100(11°)	

O número dentro de () na resistência aos sulfatos indica o ciclo em que ocorreu a destruição do provete

2.3.5 Avaliação da microestrutura em termos de silicatos de cálcio hidratados observados [6]

Para a realização da análise por SEM, as amostras foram revestidas com ouro-paládio. As análises térmicas desenrolaram-se ao ar, a 10°C/min, desde a temperatura ambiente e até se atingirem 1200°C. Estas análises apenas puderam ser realizadas sobre algumas das argamassas, tendo-se optado pelas formuladas com o traço volumétrico intermédio entre a cal aérea e os componentes pozolânicos (designado como traço 2 e cujas características obtidas tinham sobressaído). Embora nas análises térmicas realizadas sobre as diversas argamassas a desidratação dos compostos hidráulicos tenha ocorrido na mesma gama de temperaturas, a sua aparência é distinta quando observada por SEM, tal como pode ser apreciado na fig. 6. Esta distinção de aparências pode ser atribuída à diferente composição dos componentes pozolânicos, que resulte na cristalização de compostos hidráulicos do tipo dos correntemente designados por silicatos de cálcio hidratados (CSH) do tipo da tobermorite.

A influência dos diferentes componentes pozolânicos pode ser observada entre a fig. 6 A (argamassas de referência só de cal aérea) e B a F (com diferentes componentes pozolânicos). O provete de argamassa com pozolana natural sujeita a cura húmida mostra um revestimento uniforme de agulhas muito finas em quase todas as partículas (fig. 6 B). A influência das condições de cura pode ser observada no caso das argamassas com cinzas volantes. No caso do provete sujeito a cura húmida (**fly 2H**) constata-se uma maior proliferação e desenvolvimento de cristais fibrosos típicos de CSH comparativamente a provete de argamassa semelhante mas sujeito a cura seca (**fly 2D**), onde o desenvolvimento ocorre a partir da superfície das partículas das cinzas (respectivamente fig. 6 D e C). Entre as argamassas com pozolanas artificiais sujeitas a tratamento térmico apenas foram examinados provetes de argamassas com material pozolânico cozido a 800°C sujeitos a cura húmida. No caso da argamassa com material cerâmico de barro vermelho cozido (**cer800 2H**) o desenvolvimento de cristais CSH resulta em alguns grandes e longos cristais fibrosos, com pequeno crescimento iniciado à superfície das partículas de barro vermelho (fig. 6 E), enquanto na argamassa com caulino cozido (**kao800 2H**) ocorre um desenvolvimento mais denso e uniforme que cobre a superfície das partículas (fig. 6 F) [6]. Os resultados destas análise em termos do desenvolvimento de CSH são qualitativamente apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Desenvolvimento de CSH das argamassas e pozolanicidade dos componentes

Argamassa	Desenvolv. CSH	Pozolanicidade
poz 2H	+++	+
cz 2D	+	+++
cz 2H	(+)++	+++
bv800 2H	(++)+	+++++
cau800 2H	++++	+++++

Maior quantidade de símbolos + indica maior intensidade da característica analisada
() indica cristais mais longos

3. Discussão

Na fig. 7 representam-se a porosidade aberta, as resistências mecânicas (tracção por flexão e compressão) e as resistências aos sais solúveis (em termos das variações de massa ocorridas ao fim de 50 e 25 ciclos dos ensaios, respectivamente de cloretos e de sulfatos) das argamassas com traço intermédio analisado (2 – 1:1:4).

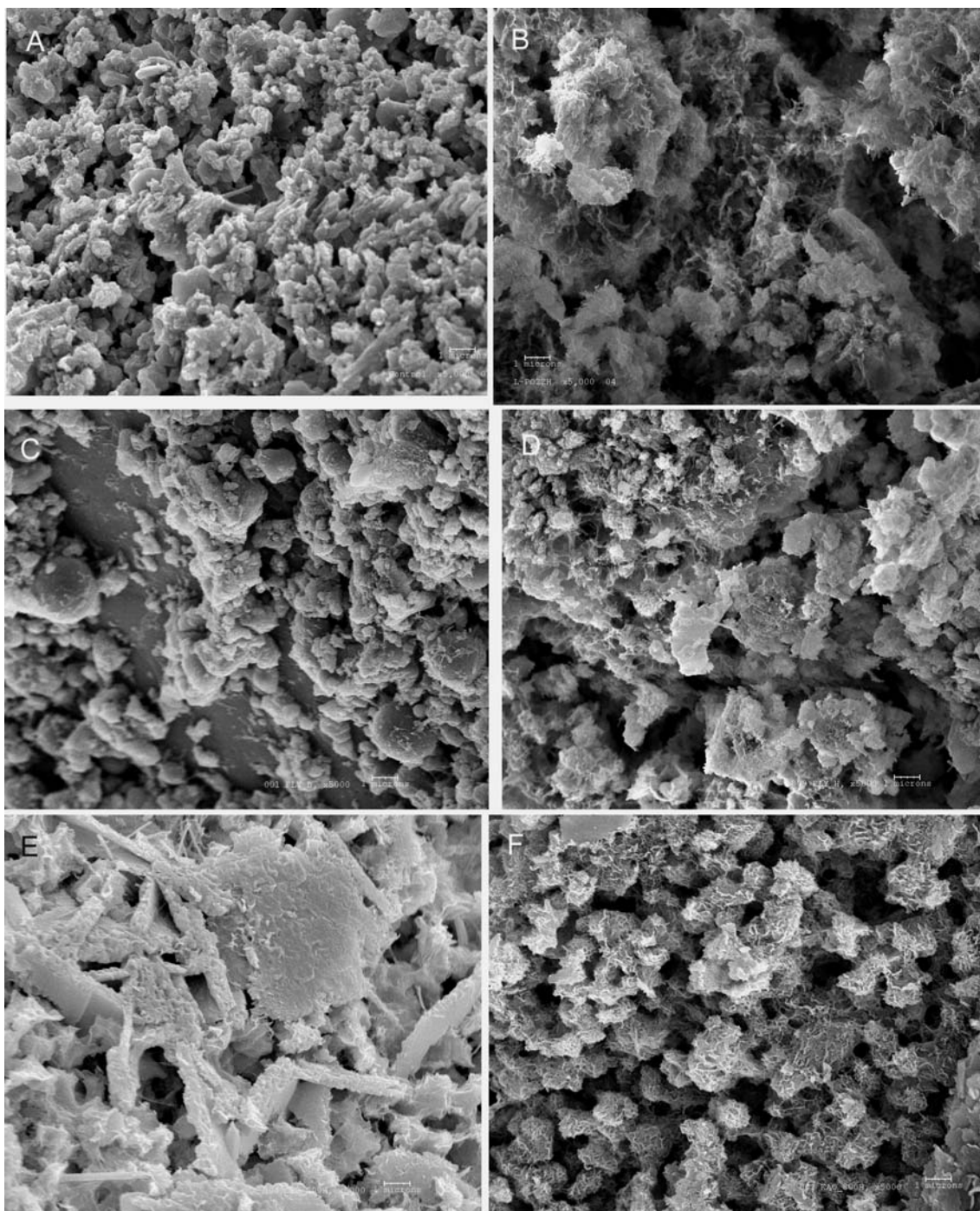


Fig. 6 – Resultado da observação por SEM de superfícies de fractura de argamassas de cal e diferentes componentes pozolânicos (5000x; A – lime0; B – poz 2H; C – fly 2D; D – fly 2H; E – cer800 2H; F – kao800 2H) [6]

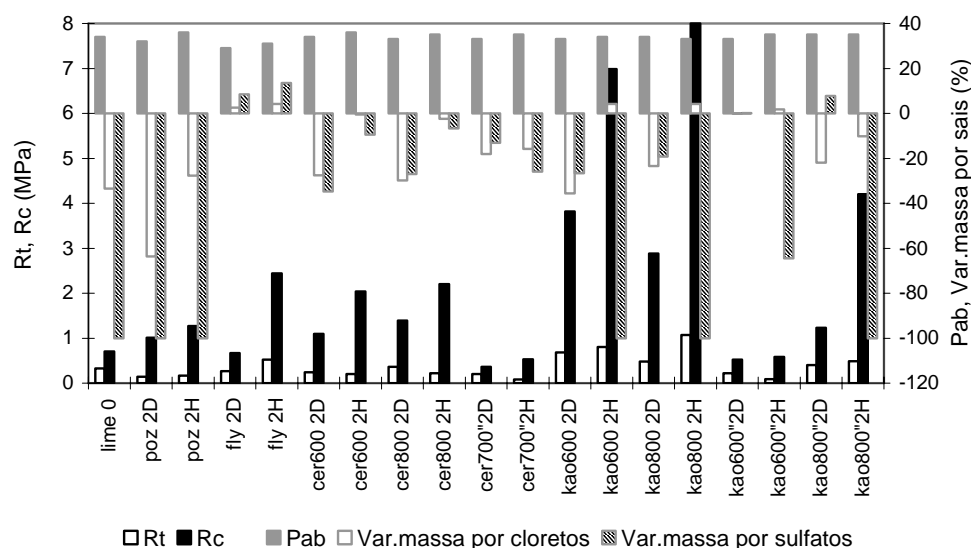


Fig.7 – Porosidade aberta e resistências mecânicas e aos sais das argamassas

Os valores mais baixos da porosidade aberta entre as argamassas analisadas foram registados pelos provetes com cinzas volantes e, de um modo geral, as argamassas com cada um dos diferentes componentes pozolânicos sujeitas a cura húmida apresentam valor de porosidade aberta superior ao registado pela argamassa semelhante mas cujos provetes foram submetidos a cura seca. Considera-se a possibilidade destas diferenças ao nível da porosidade aberta poderem ser justificadas por distinções ao nível da porometria das argamassas obtidas, função do tipo de cura a que foram sujeitas. Em condições de cura húmida a água demora mais tempo a desaparecer de dentro dos poros da argamassa e quando tal acontece esta já está suficientemente endurecida de modo que a retracção de secagem que possa ocorrer não será tão elevada, uma vez que o tamanho dos poros estabiliza com o volume que estes tinham quando estavam parcialmente cheios de água. Simultaneamente, a cura húmida possibilita o prolongamento do período no qual há existência de condições para a reacção pozolânica poder desenvolver-se (que é lenta e que necessita da presença da água), pelo que menor quantidade de óxido de cálcio poderá permanecer livre e daí um menor volume dos poros vir a ser ocupado pela precipitação de carbonato de cálcio no seu interior.

As resistências mecânicas são geralmente incrementadas pela utilização de componentes pozolânicos nas argamassas de cal aérea analisadas (excepto nos casos em que se utilizaram pozolanas artificiais calcinadas a baixa temperatura durante um curto período de tempo – **cer700** e **kao600**) e os valores obtidos são positivamente sensíveis à introdução de condições de cura húmidas.

A variação de massa por acção de cloretos nas argamassas com componentes pozolânicos é genericamente inferior à da argamassa de referência só de cal aérea, o que mostra que a utilização destes componentes contribui para a melhoria da resistência aos cloretos de argamassas com base em cal aérea. Fica também demonstrado que as condições de cura húmida contribuem para o incremento da resistência aos cloretos deste tipo de argamassas. No que se refere à resistência aos cloretos, a fig. 3 permite aferir que o traço em componente pozolânico tem particular importância no caso em que as argamassas são sujeitas a cura seca (caso em que a reacção pozolânica termina precocemente e parte desse componente acaba por funcionar como agregado). Mas a melhoria de comportamento aos cloretos referida nem sempre está associado ao aumento das resistências

mecânicas (como pode ser por exemplo visualizado na fig. 7 com os casos das argamassas **fly 2D**, **cer700''2D** e **H**, **kao600''D** e **H**, entre as elaboradas com traço intermédio). Esta situação pode eventualmente ser explicada por diferente porometria das argamassas, que permita a formação e dissolução de cristais de halite no volume do poro, sem provocar danos na sua envolvente. Simultaneamente pode ainda admitir-se a formação de sal de Friedel que venha a consumir iões cloreto, fixando-os à alumina dos componentes pozolânicos das argamassas.

No que se refere à acção dos sulfatos, uma comparação entre os diferentes traços evidencia a melhor eficiência atingida com as argamassas com traço 2, com uma ligeira diminuição com o traço mais forte em componente pozolânico e uma redução mais acentuada da resistência aos sulfatos com o traço mais baixo nesse componente. Pode ser enfatizado o especial bom comportamento obtido com as argamassas com cinzas volantes, a eficiência obtida com os resultados registados pelas argamassas com material cerâmico de barro vermelho e o comportamento diferenciado registado com as argamassas com caulinos cozidos (cujas argamassas sujeitas a cura seca com pozolanas artificiais com fraco tratamento térmico apresentaram bom comportamento, enquanto argamassas sujeitas a cura húmida e contendo pozolanas artificiais submetidas a elevado tratamento térmico registaram comportamento muito deficiente). De acordo com os resultados da pozolanicidade dos componentes e a avaliação da microestrutura das argamassas em termos do desenvolvimento de silicatos de cálcio hidratados, o caulino cozido pareceu ser o material mais reactivo, induzindo um elevado desenvolvimento de compostos hidráulicos, como se pode aferir da tabela 3. Por ataque por sulfatos, estes silicatos de cálcio hidratados CSH (e eventualmente outros aluminatos de cálcio hidratados CAH) podem formar sulfo-silicatos de cálcio hidratados (e sulfo-aluminatos de cálcio hidratados) que são muito expansivos e destrutivos.

Comparando os resultados dos ensaios de resistência aos sais solúveis em termos da variação de massa ocorrida por acção de cloretos e por acção de sulfatos observa-se que uma argamassa que apresente boa resistência a um destes tipos de ataque nem sempre regista um comportamento eficiente face a ataque pelo outro sal solúvel (como é por exemplo o caso de muitas das argamassas com caulinos cozidos sujeitas a cura húmida), o que confirma que os dois tipos de sais em análise produzem diferentes ataques sobre as argamassas analisadas. O desempenho das argamassas face à acção de sais solúveis pode ser incrementado com o aumento das resistências mecânicas (ao nível de argamassas com base em cal aérea hidratada) enquanto outras condições tais como a porometria (no caso dos cloretos) e os compostos hidráulicos formados (no caso dos sulfatos) podem desempenhar um papel muito importante.

4. Conclusões

Os resultados obtidos com os ensaios de resistência à acção de cloretos e de sulfatos realizados sobre as argamassas de cal aérea hidratada e componentes pozolânicos enfatizam o facto das resistências mecânicas dessas argamassas apenas poderem contribuir parcialmente para o desempenho desses produtos face ao ataque por sais solúveis. Uma das razões pode ser devida às relativamente baixas resistências que estas argamassas apresentam, de modo a poderem ser compatíveis mecanicamente com edifícios históricos.

No que respeita à resistência aos cloretos, um papel importante pode possivelmente ser desempenhado pela porometria das argamassas (possuindo poros de volume tal que permitam que a cristalização/dissolução da halite ocorra no seu interior, sem provocar tensões excessivas que causassem danos no material envolvente) e pelo eventual consumo e fixação de iões cloreto na formação de sal de Friedel.

Relativamente à resistência aos sulfatos deve procurar atingir-se um compromisso entre o grau de hidraulicidade das argamassas (em termos de formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados – CSH e CAH) e o controlo do potencial desenvolvimento de sulfo-silicatos e sulfo-aluminatos de cálcio hidratados decorrentes do ataque por sulfatos solúveis.

Agradecimentos

A autora agradece ao Professor Doutor Fernando M. A. Henriques e ao Mestre Arquitecto Vasco Moreira Rato pela revisão efectuada a este trabalho.

Referências bibliográficas

1. FARIA RODRIGUES, P.; HENRIQUES, F. M. A.- “Current mortars in conservation: an overview”. *International Journal for Restoration*, vol.10, nº6, December 2004, pp.609-622.
2. FARIA RODRIGUES, P. – *Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa (Portugal), Universidade Nova de Lisboa, 2004 (PhD thesis).
3. HENRIQUES, F. M. A. – *Pedras naturais e artificiais. Análise de argamassas. Fe 02, 06, 11, 12, 19, 25, 27 UNL/FCT*. Caparica (Portugal), Universidade Nova de Lisboa, 1996 a 2003 (collection of test specifications).
4. INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) / COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – *Métodos de Ensaio de Cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos*. Lisboa (Portugal), 1996. IPQ. NP EN 196-5.
5. IPQ – *Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade*. Lisboa (Portugal), IPQ, 1993. NP 4220.
6. CHAROLA, A. E.; FARIA RODRIGUES, P.; MCGHIE, A. R.; HENRIQUES, F. M. A. - "Pozzolanic Components in Lime Mortars: Correlating Behaviour, Composition and Microstructure", in *MONUBASIN 2004 - 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbon (Portugal), April 2004, CD-ROM.

In Seminário Internacional COMPASS – Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Lisboa, LNEC, Fevereiro 2005, p.9.1-9.14.